산업용 전기집진기 내 유동 균일성에 대한 입구 디퓨저 확장각의 영향

권 현 구, 박 석 환, 조 형 희*†, 박 기 서**
연세대학교 대학원 기계공학과, *연세대학교 기계공학과, **(주)한국코트렐

Effect of Inlet Diffuser-Angle for Flow Uniformity of Industrial Electrostatic Precipitators

Hyun Goo Kwon, Suk Hwan Park, Hyung Hee Cho*†, Ki Seo Park**
Graduate School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
**Korea Cottrell Co., Ltd., Seoul 121-817, Korea*

(Received August 23, 2005; revision received February 18, 2006)

ABSTRACT: Industrial electrostatic precipitators require a highly uniform velocity distribution in the collecting chamber. Increasing divergence angle of a diffuser makes a non-uniformity flow distribution characteristics on the diffuser exit. This paper provides CFD results of optimum positions and opening rates of perforated plates which were installed in the electrostatic precipitator. The considered divergence angels were 60 degree and 90 degree. In 90 degree diffuser, a blanking method was used.

Key words: Diffuser flow(디퓨저 유동), Electrostatic precipitator(전기집진기), Divergence angle (확장각), Perforated plate(다공판)

기 호 설 명

AR : 면적비($= W_2/W_1$)
C_P : 정압계수
C_{Pr} : 정압회복계수
d : 단일 다공직경 [m]
D_h : 시험덕트 수력직경 [m]
L_1 : 디퓨저 전단 연결덕트 길이 [m]
L_2 : 집진부 길이 [m]
L_d : 디퓨저 길이 좌표
N : 디퓨저 축방향 길이 [m]
Re_{Dh} : Reynolds 수, $U_\infty D_h/\nu$
S_1 : RMS% 계산위치
t : 다공판 두께 [m]
t/d : 다공판 형상계수
U_1 : 디퓨저 입구유속 [m/s]
W_1 : 디퓨저 전단 연결덕트 폭 [m]
W_2 : 집진부 폭 [m]
x, y : 길이 좌표

그리스 문자

2θ : 확장각 [°]

† Corresponding author
Tel.: +82-2-2123-2828; fax: +82-2-312-2159
E-mail address: hhcho@yonsei.ac.kr

1. 서 론

발전소의 연소가스에 포함된 가스상 및 입자상 분진을 제거하는 장치의 일종인 전기집진기(elec-

trostatic precipitator)는 집진판 사이의 코로나 방전(Corona discharge)을 이용하여 이물질을 포집하게 된다. 집진판 사이의 분진을 하전(charging)시켜 포집하기 때문에 비교적 작은 유속이 집진판 사이에 형성된다. 하지만 저속으로 인해서 집진부 이외의 영역에서 분진이 벽 등에 붙어서도 안된다. 따라서 이러한 조건을 만족시키고자 집진부 상단에는 디퓨저(diffuser)가 설치된다. 디퓨저 내부에서 유동은 확장부를 진행하면서 벽 근처부터 역압력 구배로 인한 박리(separation)가 발생하게 된다. 디퓨저 확장각(divergence angle)에 따라서 유동은 실속(stall) 영역 및 제트유동 영역 등의 특성을 나타낸다.[1] 이러한 유동현상들은 결국 집진부에서의 집진효율 저하에 영향을 미치게 된다. 선행 연구결과에서는 단순 디퓨저에서 최대 효율을 가지는 총 확장각은 약 7° 정도로 알려져 있다.[2] 이러한 디퓨저 유동을 제어하여 균일유동을 형성하기 위해서 다공판(perforated plate) 및 스크린(wire gauze)이 일반적으로 사용되고 있다. 다공판 및 스크린이 설치된 디퓨저에서 출구유동 균일성에 영향을 미치는 인자로는 다공판 및 스크린의 설치위치, 개수, 그리고 개구율(opening rate, %) 등이다.[3]

디퓨저 설계에 대한 초기의 연구는 Schubauer and Spangenberg[4]에 의해서 많이 이루어졌으며, 1997년까지는 면적비 5 이하의 디퓨저에 대한 연구들이 주로 이루어졌다. 그러나 산업설비가 점차 대형화되면서 큰 디퓨저의 면적비에 대한 연구들이 Sahin 등에 의해서 폭넓게 이루어졌다.[2,5-8] 그는 면적비가 6.8이고 좌우 확장각이 다른 비대칭 디퓨저에서 2개의 다공판을 사용하여 출구에서의 균일한 속도분포를 얻을 수 있는 다공판의 설치위치와 다공률 제원을 제시하였다.[5] 또한 면적비가 10인 대칭 사각 디퓨저에 대해서 모형실험을 통해서 디퓨저 출구에서의 유동형태 및 속도균일성을 위한 다공판 및 스크린 제원을 제시하였다.

본 연구에서는 대용량 화력발전소 전기집진기용에 사용되는 면적비(AR)가 13인 디퓨저에서 디퓨저 출구유동 균일화를 확보할 수 있는 다공판 제원을 도출하고자 한다. 특히, 디퓨저의 확장각이 달라짐에 따라서 출구의 속도분포에 미치는 영향을 살펴보고 그에 따른 다공판 적용에 대한 설계자료를 제공하고자 한다.

2. CFD 조건

FVM 방법으로 상용으로 사용되고 있는 Fluent 6.1을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 경계조건은 상온, 대기압이며 입구부에서는 10 m/s의 자유유동속도(U_∞)를 설정하였다. 입구 수력직경 D_h는 0.2 m이며, 입구유동 Re_{Dh} 수는 1.37×10^5였다.

해석모델은 입구 덕트, 대칭 피라미드형 디퓨저, EP 챔버로 구성되어 있다. 모델링 및 메쉬생성은 *gambit* 2.1을 사용하였으며, 전체 모델의 1/4만을 모델링하여 symmetry 경계조건을 적용하였다. 총 메쉬수는 약 15만개였다. 이는 총 83만개 메쉬의 결과와 압력회복계수(C_{p_r})가 1.4%로 큰 차이가 없었다. 디퓨저 확장각의 변화에 따른 출구유동 특성을 확인하기 위해서 2가지 확장각($2\theta=60°$, 90°)에 대한 모델을 적용하였다.

Fig. 1은 전체 모델제원 및 다공판 설치위치에 대한 개략도를 나타낸다. Fig. 1의 점선은 다공판

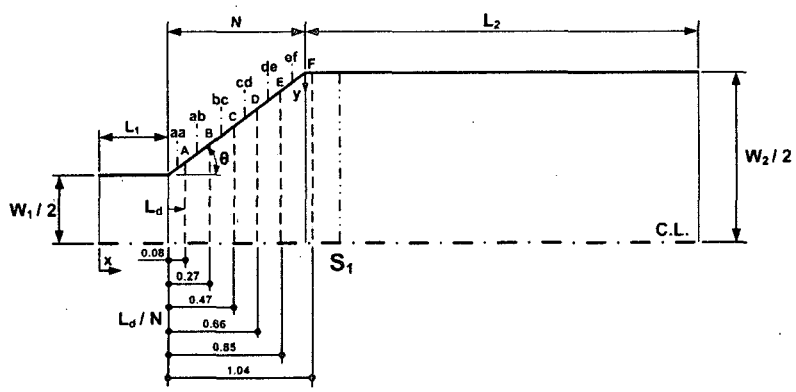


Fig. 1 Schematic view of present study domain.

Table 1 Details of present domain

L_1 [cm]	L_2 [cm]	W_1 [cm]	W_2 [cm]	N [cm]	AR	2θ	t/d
30	180	20	72	45, 26	13	60°, 90°	0.064

의 설치위치(A~F)를 나타낸 것이다. 디퓨저 출구에 다공판을 설치하는 것이 일반적이므로 본 연구에서는 2번 다공판(P#2)을 "F" 위치에 고정시키고, 1번 다공판(P#1)의 위치를 "A"~"E"(L_d/N)에서 위치를 바꾸어 가면서 해석을 수행하였다. 디퓨저 출구에서의 유동분포는 S_1(L_d/N=1.33)에서 확인하였다. 해석대상의 세부제원들은 Table 1에 정리하였다.

다공판은 전체적으로 일정한 다공률을 가지도록 모델링하였다. 다공판의 형상계수(t/d)는 0.064이며, 압력손실계수(K)는 상관식(1)을 사용하였다. 상관식(1)은 실험결과와 10% 이내에서 잘 일치하는 결과를 나타냈다.[6]

$$K=\left[\frac{1}{0.609\beta\{1-\beta^{2.6}\}\left\{1+\left(\frac{t}{d}\right)^{3.5}\right\}+\beta^{3.6}}-1\right]$$
$$(0.006<\beta<0.75,\quad t/d<0.8)$$
$$K=\left(\left[\beta\left(0.872-0.0149\frac{t}{d}-0.08\frac{d}{t}\right)(1-\beta^{3.3})+\beta^{4.3}\left\{1+0.134\left(\frac{t}{d}\right)^{1/2}\right\}^{-1}\right]^{-1}-1\right)^2 \quad (1)$$
$$(0.8<t/d<7.1,\quad 0.002<\beta<0.53)$$

난류모델은 RNG κ-ε 모델을 사용하였다. 큰 확대관과 같은 박리문제에서 RNG κ-ε 모델이 다른 모델에 비해서 더 좋은 결과를 나타내는 것으로 보고되어진 바 있다.[9]

3. 결과 및 고찰

디퓨저 출구에서의 유동 균일성 기준은 IGCI (Industrial Gas Cleaning Institute)[10]에서 제시한 유속분포 및 RMS%를 기준으로 하였다. RMS% 계산식은 식(2)와 같다.

$$\mathrm{RMS\%}=\left(\sqrt{\left(\frac{U-\overline{U}}{U}\right)^2-1}\right)\times 100 \quad (2)$$

다공판-디퓨저 덕트에서의 다공판 위치 및 다공률 변화에 따른 정압분포를 계산하였다. 정압계수식은 다음 식(3)과 같이 정의하였으며,

$$C_P=\frac{P-P_r}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (3)$$

P_r과 U_∞은 디퓨저 상류(x/W_1=0)에서의 정압 및 평균 유속을 나타낸다. 압력회복계수는 다음 식(4)와 같이 계산하였다.

$$C_{Pr}=\frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U^2}=\frac{P_a-P_r}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (4)$$

여기에서, P_a는 디퓨저 하류(x/W_1=3)에서의 정압을 의미한다.

3.1 빈 디퓨저(Empty diffuser)에서의 유동 특성

디퓨저-챔버 내부에서의 기본적인 유동 특성을 살펴보기 위해서 여러 가지 확장각에 대해서 다공판이 설치되지 않은 경우의 해석을 수행하였다. 확장각(2θ)이 20°에서부터 90°까지 총 6가지의 디퓨저에 대해서 수치해석을 수행하였다. Fig. 1은 각 경우에 대해서 디퓨저-챔버 벽면에서의 압력분포를 나타내고 있다.

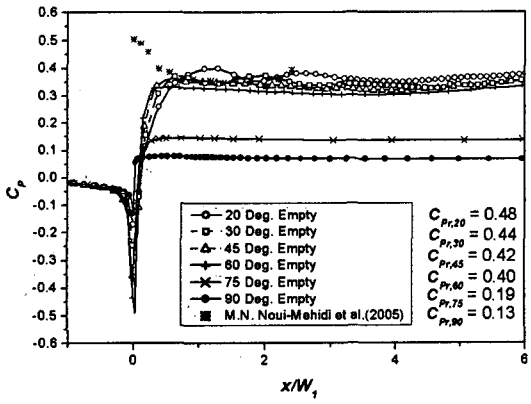


Fig. 2 Pressure distributions with various diffuser angles.

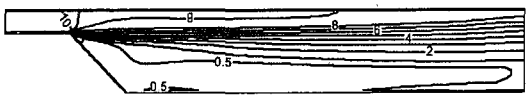
Fig. 2에 보는 바와 같이 디퓨저의 확장각의 변화에 따라서 다른 유동박리 특성이 나타남을 확인할 수 있다. 확장각 20°~60°의 결과를 살펴보면, 디퓨저 확장 시작부에서 급격한 압력구배를 나타낸 뒤 곧 압력이 회복되었으며, 디퓨저 내부에서의 다소 불안정한 유동 이후에 디퓨저 출구부터는 다시 압력이 서서히 회복되어 간다.

반면, 디퓨저 확장각이 70° 이상에서는 급격한 압력구배를 가진 후 매우 낮은 압력회복을 나타냈다. 이는 디퓨저 입구에서 박리된 유동이 챔버의 거의 전 구간에서 형성된 것을 의미한다.

압력 손실은 전체적으로 확장각이 커짐에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 확장각이 60°에서의 압력회복계수는 0.4로써, Noui-Mehidi et al.[3]이 측정한 0.375와 유사한 결과를 나타냈다. Noui-Mehidi 등이 사용한 비대칭 디퓨져($2\theta=60°$, $2\lambda=45°$)와 입구유속의 차이로 인해서 다소 차이가 발생한 것으로 판단된다.

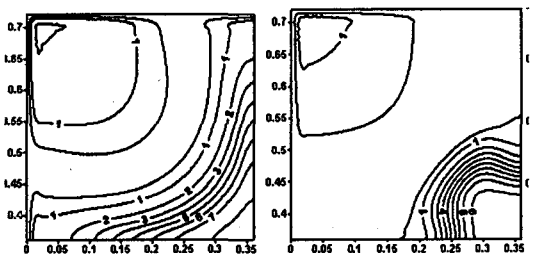
Fig. 3과 Fig. 4는 60°와 90° 디퓨저에서 다공판을 적용하지 않은 경우의 결과들이다. Fig. 3에서 두 모델에서의 유동 특성이 확연히 구분되어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 4는 디퓨저 총 확장각이 60°(Fig. 3(a))와 90°(Fig. 3(b))인 경우에서의 측정면 S_1에서의 유동분포를 나타낸 것이다(좌우상하 대칭으로 상부좌측 1/4만 표시함). 확장각 60° 디퓨저에서는 챔버 중앙부분에 십자 형태의 유동이 형성되었으며, 확장각 90° 디퓨저에서는 중앙부에서 원형의 자유제트형태의 유동 특성을 나타냈다.

(a) 60° Empty diffuser



(b) 90° Empty diffuser

Fig. 3 Contours of velocity magnitude within 60° and 90° empty diffuser.



(a) 60° Diffuser (b) 90° Diffuser

Fig. 4 Contours of velocity magnitude at measuring section S_1 (m/s).

3.2 디퓨저 I ($2\theta=60°$)에서의 유동 특성

확장각이 60°인 디퓨저에서 50%의 다공률을 가

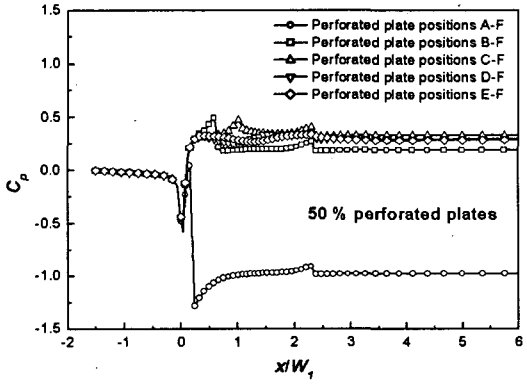


Fig. 5 Wall static pressure distributions within 60° diffuser (50% opening).

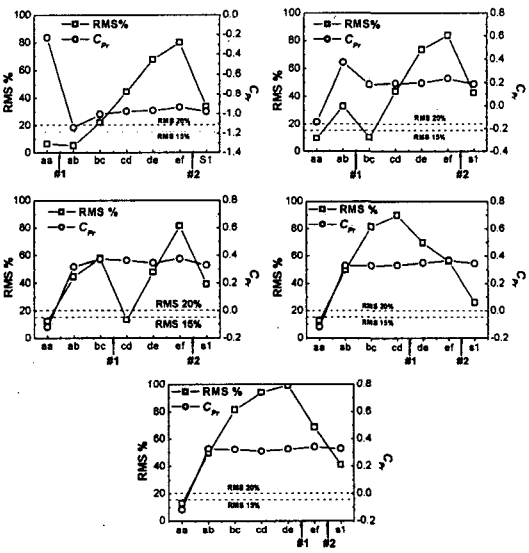


Fig. 6 RMS% and C_{Pr} characteristics within 60° diffuser (50% opening).

지는 다공판 2개를 각각 설치하였다. 이는 현재 전기집진기에서 일반적으로 사용하고 있는 다공판 제원이다. 2번 다공판은 "F" 위치에 고정시키고, 1번 다공판을 "A"부터 "E"까지 위치를 변화시키면서 유동 특성을 해석하였다.

Fig. 5는 각 경우에 대한 챔버 벽에서의 압력분포를 나타낸 것이다. 다공판 앞에서 각 경우의 압력이 피크값을 가진 후 다공판 후 다시 압력이 떨어지는 경향을 보였다. 1번 다공판이 디퓨저 입구 근처에 설치된 경우에는 다른 경우보다 압력손실이 매우 크게 나타났다. 디퓨저 내 다공판의 위치에 따라서 측정 단면에서의 RMS% 및 압력특성이 크게 달라짐을 Fig. 6을 통해서 알 수 있다. 디퓨저 입구부분을 지나면서 운동에너지가 압력에너지로 바뀌면서 정압이 상승하게 된다. 그러나 이후 압력상승은 지속적으로 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다.

특히, 다공판이 디퓨저 입구 바로 후단에 위치된 경우는 다공판을 지난 유동이 단면방향 속도성분으로 인해 벽 제트(wall jet)를 형성하여서 벽면에서의 정압은 증가하지 않게 된다. RMS%는 다공판을 지날 때마다 급격히 감소하였으나, 다공판의 위치가 디퓨저 입구 근처에 있을 때("A", "B")는 압력 손실이 다른 경우에 비하여 크게 나타났다. 디퓨저 출구에서의 최소 RMS%는 다공판이 각각 "D"와 "F" 위치에 있을 때 약 26%를 나타냈다.

Fig. 7과 Fig. 8은 다공판의 다공율을 조정하여 적용한 결과를 나타낸 것이다. 여러 경우에 대한 시뮬레이션 결과로부터 1번 다공판은 58%, 2번 다공판은 53%의 다공률을 각각 적용하였다. 특히, 1번 다공판의 다공률이 증가함으로 인해서 벽제트의 영향이 줄어들었다. 그 결과 RMS%는 향상되었고, 압력손실도 감소된 것을 볼 수 있다. 다공판이 각각 "A"와 "F"의 위치에서 RMS%는 최저인 19.8%를 나타냈다.

Fig. 9는 다공률 58%와 53%를 각각 "A"와 "F" 위치에 적용하였을 경우의 검사면(S_1)에서의 유동방향 속도분포를 나타낸 것이다. 최종 검사면 S_1에 벽 근처를 제외한 대부분의 영역에서 균일한 유동을 확인할 수 있다.

3.3 디퓨저 II(2θ=90°)에서의 유동 특성

디퓨저의 확장각이 커지게 되면 출구에서의 유

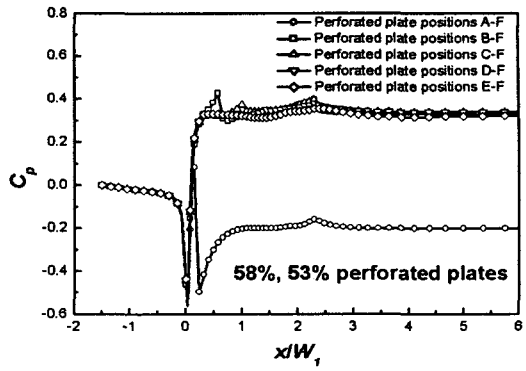


Fig. 7 Wall static pressure distributions within 60° diffuser (58 and 53% opening).

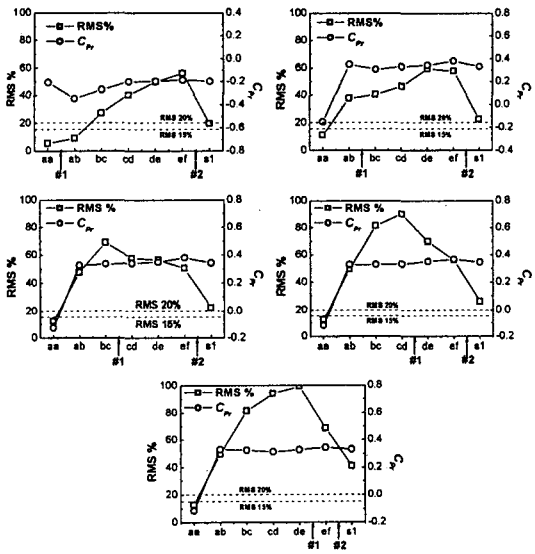


Fig. 8 RMS% and C_{Pr} characteristics within 60° diffuser (58% and 53% opening).

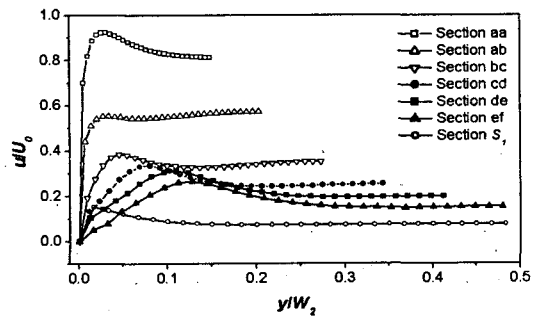


Fig. 9 Velocity distributions at the horizontal axis of the measuring sections.

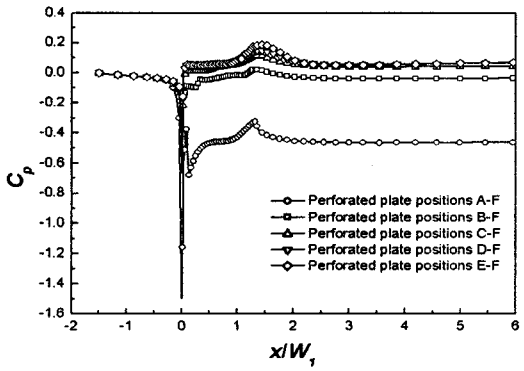


Fig. 10 Wall static pressure distributions within 90° diffuser.

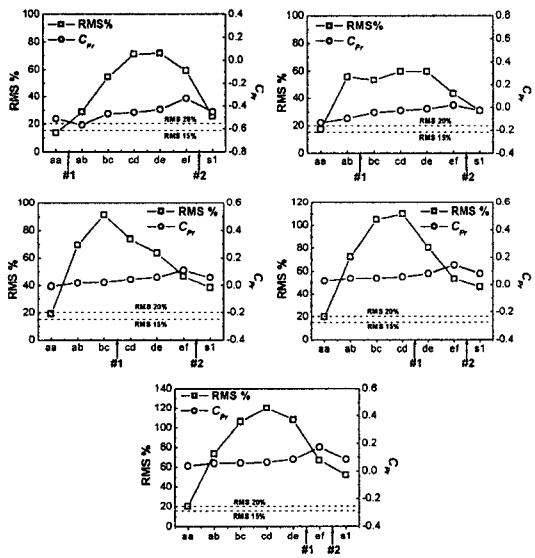


Fig. 11 RMS% and C_{Pr} characteristics within 90° diffuser.

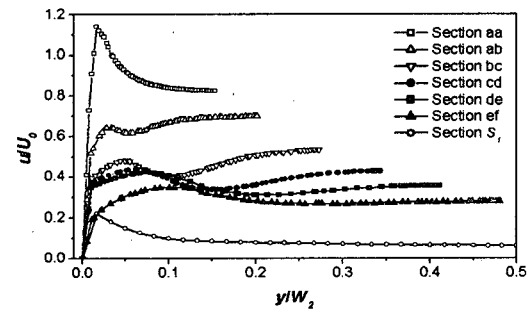


Fig. 12 Velocity distributions at the horizontal axis of the measuring sections.

동은 더욱 불균일하게 된다. 다공판 등이 설치되지 않은 경우는 자유제트형태의 유동이 디퓨저 내에 형성된다(Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)). 디퓨저 출구의 유동을 제어하기 위해서 다공판을 설치할 경우는 다공판의 위치와 다공률, 그리고 다공판의 개수에 따라서 다양한 유동형태가 나타난다. 본 경우에서는 여러 경우를 시뮬레이션한 결과 다공판을 국소적으로 다르게 적용하여 유동을 균일하게 제어하였다. 1번 다공판은 전체적으로 58%로 균일한 다공률을 적용하였으며, 2번 다공판에는 58%와 53%를 국소적으로 다르게 적용하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 이 경우에서의 해석결과를 나타낸 것이다. 디퓨저 내의 유동은 다공판의 위치에 따라 두 가지 형태를 나타냈다. 1번 다공판이 디퓨저 입구 쪽으로 가까이 위치할수록 벽제트(wall jet) 형태의 유동이 강하게 형성되었고, 디퓨저 입구에서 멀리 위치할수록 자유제트(free jet) 형태의 유동이 강하게 형성되었다. 그 결과 다공판이 A-F에 위치한 경우는 강한 벽제트로 인해서 매우 낮은 정압이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 큰 확장각으로 인해서 유동은 극단으로 치우치면서 디퓨저 각 단면에서의 RMS%는 작은 확장각에 비해서 비교적 높은 수치를 보였다. 또한, 1번 다공판의 위치가 디퓨저 입구에서 멀어지면서 벽제트가 벽으로부터 점차 분리되어 벽 근처에서는 정체유동 영역이 형성되었다. 그 결과 디퓨저 대부분의 구간에서 일정한 압력분포를 가지는 것을 볼 수 있었다(Fig. 11).

Fig. 12는 디퓨저 각 단면에서의 축방향 속도 분포를 나타낸 것이다. 검사면 S_1에서 벽 근처의 제트유동으로 인한 일부 빠른 유속을 제외하고는 균일해진 유동을 확인할 수 있다. 90° 디퓨저에서 다공판이 각각 "A"와 "F" 위치일 때, 디퓨저

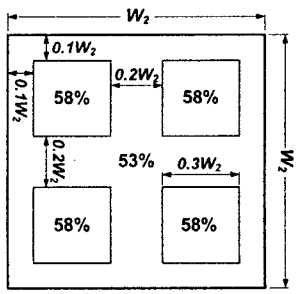


Fig. 13 Composition of perforated plate #2.

출구에서 가장 균일한 유속분포를 얻을 수 있었다. 이 경우의 RMS%는 약 25%였다.

Fig. 13은 다공판막음 방법을 사용하여 최적화한 2번 다공판에서의 다공율 제원을 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 산업용으로 사용되고 있는 대용량 전기집진 설비 가운데, 큰 확장각을 가지는 디퓨저에서의 유동을 수치해석 프로그램을 이용하여 해석하였다. 디퓨저의 확장각에 따라서 디퓨저 출구에서의 속도분포는 크게 달라지며, 이를 제어하기 위하여 다공판을 적용하였다. 본 연구에서는 다공판의 개수, 위치, 그리고 다공률 제원이 각 디퓨저의 확장각에 따라 달라져야 함을 확인하고, 그 제원을 도출하였다.

확장각(2θ)이 60°인 디퓨저 I 에서는 2개의 다공판을 적용하였으며, 다공판의 설치위치는 $L_d/W_1=0.08$과 $L_d/W_1=1.04$에서 최적의 출구속도분포를 얻을 수 있었다. 다공률은 각각 58%, 53%였다. 최저의 RMS%는 약 20%로 나타났다.

확장각이 90°인 디퓨저 II에서는 큰 확장각의 영향으로 인해서 박리가 크게 발생하였으며, 이 영향을 최소화하기 위해 다공판 막음방법(blanking method)을 사용하였다. 다공판은 총 2개를 사용하였다. 다공판의 설치위치는 $L_d/W_1=0.08$, $L_d/W_1=1.04$일 때 최소의 RMS% 약 25%를 얻을 수 있었다. 다공판 1번의 다공률은 58%였으며 다공판 2번의 다공률은 Fig. 13과 같이 58%와 53%를 국소적으로 다르게 적용하였다.

후 기

서울과학장학생 사업을 통하여 연구를 진행할 수 있도록 도움을 주신 서울시에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ward-Smith, A. J., Lane, D. L., Reynolds, A. J., Sahin, B. and Shawe, D. J., 1991, Flow regime in wide-angle screen diffusers, Int. J. Mech. Sci., Vol. 33, No. 1, pp. 41-54.
2. Sahin, B. and Ward-Smith, A. J., 1990, Effect of perforated plates on wide-angle diffuser-exit velocity profiles, J. Wind Eng. and Industrial Aero., Vol. 34, pp. 113-125.
3. Noui-Mehidi, M. N., Wu, J., Sutalo, I. D. and Grainger, C., 2005, Velocity distribution downstream of an asymmetric wide-angle diffuser, Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol. 29-6, pp. 649-657.
4. Schubauer, G. B. and Spangenberg, W. G., 1943, Effect of screens in wide-angle diffusers, National Advisory Committee for Aeronautics, TN No. 1610.
5. Sahin, B. and Ward-Smith, A. J., 1987, The use of perforated plates to control the flow emerging from a wide-angle diffuser, with application to electrostatic precipitator design, Heat and Fluid Flow, Vol. 8, No. 2, pp. 124-131.
6. Sahin, B., 1989, Pressure losses in an isolated perforated plate and jets emerging from the perforated plate, Int. J. Mech. Sci., Vol. 31, No. 1, pp. 51-61.
7. Sahin, B. and Ward-Smith, A. J., 1993, The pressure distribution in and flow characteristics of wide-angle diffusers using perforated plates for flow control with application to electrostatic precipitators, Int. J. Mech. Sci., Vol. 35, No. 2, pp. 117-127.
8. Sahin, B., Ward-Smith, A. J. and Lane, D., 1995, The pressure drop and flow characteristics of wide-angle screen diffuser of large area ratio, J. Wind Eng. and Industrial Aero., Vol. 58, pp. 33-50.
9. Speziale, C. G. and Thangamn, S., 1992, Analysis of an RNG based turbulence model for separated flows, Int. J. Eng. Sci., Vol. 30, No. 10, pp. 1379-1388.
10. EP2 Industrial Gas Cleaning Institute Specifications, U.S.A., 1973.